

## 과도안정도 향상을 위한 직렬콘덴서의 최적화 방안

유석구\* 문병서\*\* 김규호\*\*  
\* 한양대학교 \*\* 안산공업전문대학

### An Optimization Method of Series Condenser for Improvement of Transient Stability

Seok-Ku You\* Byoung-Seo Moon\*\* Kyu-Ho Kim\*\*  
\* Hanyang University \*\* Ansan Tech. College

**Abstract** This paper presents a method for optimal placement of series condenser in order to improve the power system transient stability using genetic algorithms(GAs). In applying GAs, this approach utilizes two kinds of strings, one is coded by a binary finite-length for the selection of lines to install series condenser, the other is coded by a real value for the determination of injected condenser capacitance. For the formulation, this paper considers multi-objective function which is the critical energy as decelerating energy in power systems and the total injected condenser capacitance. The proposed method is applied to 9-bus, 18-line, 3-machine model system to show its effectiveness in determining the locations to install series condenser and the series condenser capacitance to be injected, simultaneously.

#### 1. 서론

최근 전력계통은 대용량 발전설비의 건설, 송전 시스템의 대용량·장거리화 등 규모가 커지고, 복잡해지고 있다. 더욱이, 수용가측의 양질의 전력요구에 따른 전력공급능력의 안정성 및 신뢰성 확보는 매우 중요하게 되었다. 따라서, 전력계통의 갑작스런 외란에 대하여 동기발전기의 동기상태 유지 여부를 판별하는 과도안정도 해석 및 과도안정도 향상 방안은 전력공급의 질과 신뢰성에 많은 기여를 하게 된다. 전력계통의 안정도 해석법은 기존의 시간모의(time simulation)법과 더불어 Lyapunov 에너지함수에 의한 직접법으로 대별되고, 특히, Lyapunov 직접법은 1970년대 말, Fouad에 의하여 Lyapunov 에너지함수 구성법이 제의된 후, 실제 적용에 많은 성과를 올리고 있다[1,2]. 또한, 기존의 송전선로에 FACTS기기의 일종인 직렬콘덴서의 설치로 선로 리액턴스를 보상하여 과도안정도 향상을 위한 연구[3,4]와 직렬콘덴서의 설치에 따른 SSR(Subsynchronous Resonance) 영향분석 및 해결에 관한 연구[5]가 진행되고 있다.

본 연구에서는 전역적 탐색기법인 유전알고리즘을 이용하여 과도안정도 향상을 위한 직렬콘덴서의 설치위치와 투입량을 최적화 하였다. 목적함수는 계통의 임계에너지 최대와 직렬콘덴서의 총투입량 최소로 하는 다중목적함수이고, 제약조건은 부하모선의 전압과 선로의 정격 유효전력으로 하였다.

#### 2. 임계에너지

계통내 각 발전기들은 외란 제거 후 새로운 평형점으로 이동하여 운전하게 된다. 이러한 평형점에는 안정평형점과 불안정평형점이 있는데, 특히, 불안정평형점은 안정영역과 불안정영역의 경계점으로 발전기의 탈조여부를 판단할 수 있는 정보를 준다. 그러나, 불안정평형점들은 발전기의 수에 따라 이론상  $2^{N-1}-1$  개로 매우 많아져 현실적으로 모든 불안정평형점의 결정은 불가능하므로, 각 발전기를 1기 무한대 모선의 경우로 해석하여 안정평형점에서 가장 근접한 불안정평형점을 구하였다. Lyapunov 에너지함수는 위상각( $\delta$ )과 각속도( $\omega$ )의 비선형 함수로서  $V(\delta, \omega) > 0$ ,  $\dot{V}(\delta, \omega) < 0$  를 만족하고, 임의의 값 C에 대하여 부등식  $V(\delta, \omega) < C$  를 만족하는 영역이 안정한 영역이 된다. 따라서, C 값은 안정한 영역의 극한값으로서 각 불안정평형점에서의 에너지값을 계산하여 식 (1)처럼 가장 작은 값을 임계에너지값으로 정의한다[6].

$$V_{cr} = \text{Min}\{V(\delta^0, 0)\} \quad (1)$$

#### 3. 다중목적함수의 정식화

계통의 과도안정도 향상을 위한 직렬콘덴서 투입량의 최적화를 위하여 다중목적함수를 이용하였다.

##### 3.1 임계에너지

안정한 영역을 보다 크게 하기 위하여 계통의 임계에너지를 식 (2)처럼 최대화한다.

$$\text{Maximize } V_{cr} \quad (2)$$

그러나, 본 연구에서는 주어진 외란 제거시간에서 계통이 안정하게 되는 적정의 임계에너지  $V_{opt}$  를 향상시킬 임계에너지의 기대값으로 정하여 식 (2)의 최대화 문제를 식 (3)과 같은 최소화 문제로 변형하였다.

$$\text{Min } |V_{opt} - V_{cr}| \quad (3)$$

##### 3.2 직렬콘덴서 총투입량

3.1 항의 임계에너지에 대하여 투입된 직렬콘덴서의 총투입량을 최소화한다.

$$\text{Min } \sum_k X_{ck} \quad (4)$$

$X_{ck}$  는 k선로에 투입된 직렬콘덴서의 리액턴스이고, m은 직렬콘덴서 투입을 위하여 선택된 총 선로 수이다.

##### 3.3 제약조건

제약으로서의 제어변수 및 상태변수를 식 (5)와 같이 허용범위내에 유지토록 하였다.

$$\begin{cases} u^{\min} < u < u^{\max} \\ x^{\min} < x < x^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

여기에서, u는 제어변수로 투입되는 직렬콘덴서의 양이고, x는 상태변수로 선로의 정격 유효전력과 부하모선의 전압으로 하였다. 또한,  $u^{\min}$ ,  $u^{\max}$ ,  $x^{\min}$ ,  $x^{\max}$ 는 제어변수 및 상태변수의 상·하한치를 나타낸다.

#### 4. 유전알고리즘

Holland에 의하여 개발된 유전알고리즘(genetic algorithms : GAs)은 생물의 유전학과 자연선택에 기초한 최적점 탐색기법이다. 그리고, 탐색공간에서 해집단을 이용하여 병렬로 탐색하므로 전역적 최적해로 수렴 가능성이 높으며, 함수의 도함수와 같은 다른 정보의 필요 없이 결정적 요소(목적함수)만을 정보로 사용하므로 복잡한 비선형 함수에 적용이 용이하다.

4.1 유전알고리즘의 작용자

본 연구에서는 다음과 같은 3가지의 기본 유전작용자를 이용하였다[7].

가. 복제 (Reproduction)

적합도가 큰 개체를 생존시키는 작용자이다. 각 개체의 정규화된 적합도를 확률로 나타내면, 보다 큰 확률의 개체는 다음 세대에서 더 많은 자손을 발생시킬 확률이 크게 된다. 적합도가 가장 큰 개체는 다음 세대에 항상 생존시키는 엘리트스트 (elitist) 모델을 이용한다.

나. 교차 (Crossover)

복제 후, 새로운 개체들 중에서 교차확률에 따라 교차 대상 개체를 선정한다. 이렇게 선정된 개체들 식 (6)과 같이 두 벡터의 선형조합으로 정의되는 whole arithmetical crossover를 행한다.  $a$ 는 0과 1사이의 난수,  $S_v^t$ 와  $S_w^t$ 는 현재대의 이비이이고,  $S_v^{t+1}$ 와  $S_w^{t+1}$ 는 자손이다.

$$\begin{aligned}
 & \text{- 교차전} \quad \begin{cases} S_v^t \\ S_w^t \end{cases} \\
 & \text{- 교차후} \quad \begin{cases} S_v^{t+1} = a * S_v^t + (1-a) * S_w^t \\ S_w^{t+1} = a * S_w^t + (1-a) * S_v^t \end{cases} \quad (6)
 \end{aligned}$$

다. 돌연변이 (Mutation)

돌연변이는 국지적인 최적해로의 수렴을 방지하는 중요한 작용자로서 돌연변이 확률에 의하여 선택된 개체  $S^t$ 의 유전자  $v_k$ 를 변수의 상·하한치  $u_k^l$ 와  $l_k^u$ 내에서  $S^{t+1}$ 의 유전자  $v_k'$ 로 바꾸며, 식 (7)과 같은 non-uniform mutation을 수행한다.

$$v_k' = \begin{cases} v_k + \Delta(t, y), & y = u_k^l - v_k \\ & \text{if a random digit is 0} \\ v_k + \Delta(t, y), & y = v_k - l_k^u \\ & \text{if a random digit is 1} \end{cases} \quad (7)$$

여기서,  $\Delta(t, y) = y * (1 - r)^{(1 - \frac{t}{T}) * b}$  이고,  $r$ 은 0에서 1사이의 난수,  $t$ 는 현재대,  $T$ 는 최대세대,  $b$ 는 non-uniform 정도를 나타내는 수이다.

4.2 유전알고리즘 응용

3장에서 고려하였던 다중목적함수와 제약조건을 식(8)과 같이 가중합으로 나타낸다[8].

$$\text{Min } \sum_{i=1}^m w_i f_i(x, u) \quad (8)$$

$$\text{s.t } g(x, u) \leq 0$$

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1.0$$

$w_i, f_i$ 는 각각  $i$  번째의 가중치 및 목적함수이고,  $g(x, u)$ 는 제약식이다. 식 (8)은 페널티함수를 이용하여 식 (9)와 같이 제약을 갖지 않는 최적화 문제로 변형할 수 있다.

$$\text{Min } P(x, u) = \sum_{i=1}^m w_i f_i(x, u) + \mu \sum [\max(0, g(x, u))]^2 \quad (9)$$

식 (9)의 역을 취하여 식 (10)처럼 적합도 최대화문제로 변형할 수 있다.

$$\text{Fitness} = \frac{1}{P(x, u)} \quad (10)$$

이상의 유전알고리즘 응용에 대한 절차를 요약하면 다음과 같다.

절차 1 초기개체발생

두 종류의 개체에 대하여 초기화한다. 그림 1과 같이 선로 선택을 위한 개체는 2진수로, 직렬콘덴서 투입량 결정을 위한 개

체는 변수의 상·하한치내에서 랜덤하게 발생하여 실수로 지정한다.

1	2	.....	17	18		
1	0	1	.....	1	0	0
0.243	0.076	0.051	.....	0.112	0.317	0.023

그림 1. 개체 구성도  
Fig. 1. Structure of String

절차 2 평가

절차 1에서 구한 직렬콘덴서 투입위치 및 투입량을 이용하여 변화된 계통 어드미턴스로 조류계산과 에너지값을 구하고, 적합도를 평가한다.

절차 3 수렴판정

최대 세대에 이르렀던 멈추고, 그렇지 않으면, 절차 4로 간다.

절차 4 유전자조작

복제, 교차, 돌연변이의 3가지 유전자 작용자를 이용하여 개체의 유전자를 변화시킨 후 절차 2로 간다.

5. 사례연구

본 연구에서는 제안된 방법을 9-모선, 18-선로, 3-기의 모델 계통[9]에 적용하여, 효율성을 입증하였다. 선로 10의 모선 3쪽에서 3상 지락사고를 가정하였고, 유전알고리즘에서 개체는 50, 교차확률은 0.25, 돌연변이확률은 0.03으로하여 일정 기대값에 대한 입계에너지의 최대와 과도안정도 향상을 위한 직렬콘덴서의 총투입량을 최소로 하는 다중목적함수를 최적화 하였다. 표 1은 두 목적함수의 가중치 즉, 에너지함수의 가중치  $w1$ 과 총투입량의 가중치  $w2$ 의 변화에 대한 입계에너지값과 직렬콘덴서의 총투입량을 나타낸다. 가중치  $w1$ 과  $w2$ 의 합은 1.0이 되게 하였다[7]. 모든 경우에 대하여 입계에너지값은 기대값인 3.80에 거의 수렴하면서 과도안정도 향상도 효과가 없었다.  $w1$ 과  $w2$ 의 값을 각각 0.4와 0.6으로 놓았을 때, 직렬콘덴서의 총투입량이 가장 작게 되었다. 표 2는 각 경우에 있어서 선택된 선로 및 투입된 직렬콘덴서의 양을 나타낸 것이고, 최대 보상률은 80%로 하였다. 각 경우에 있어서의 동요곡선은 단단법(step by step)을 이용하여 확인하였다.

표 1. 목적함수의 가중치에 따른 직렬콘덴서의 총투입량  
Table 1. The total injected values of series condenser with weight for objective function

w1	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4'	0.3
w2	1.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6'	0.7
에너지값	3.8000	3.8000	3.7999	3.8000	3.8000	3.8001	3.7997
총투입량 (P.U)	0.3067	0.3430	0.3063	0.3194	0.3068	0.3018	0.3034

표 2. 선로 투입량

Table 2. Injected condenser value of each selected line

w1	w2	선로번호	투입량(P.U)	보상률(%)
1.0	1.0	1	0.22887	76.3
		5	0.07779	77.8
0.9	0.1	2	0.22466	74.9
		5	0.04081	40.8
		17	0.07752	77.5
0.8	0.2	2	0.23035	76.8
		5	0.07490	74.9
0.7	0.3	1	0.23256	77.5
		5	0.05480	54.8
		17	0.03200	32.0
0.6	0.4	2	0.22878	76.3
		5	0.07797	78.0
0.4'	0.6'	1	0.23364	77.9
		5	0.06813	68.1
0.3	0.7	2	0.23206	77.4
		5	0.07137	71.4
단일목적함수 (에너지)	최대화 경우	1	0.22562	75.2
		2	0.23296	77.7
		5	0.07802	78.0

\* 보상률 : 선로리액턴스에 대한 직렬콘덴서 리액턴스의 비

그림 2는 보상 이전의 불안정한 상태의 동요곡선이고,  $\delta_{12}$ ,  $\delta_{13}$ ,  $\delta_{23}$  은 각 발전기 사이의 상대위상각을 나타낸다. 그림 3은 임계에너지값만을 최대화하였을 때, 에너지값 및 직렬 콘덴서의 총투입량의 변화를 보여주는데, 약 170세대 이후 두 양은 거의 변화가 없게 된다. 그림 4는 이 경우 각 발전기 사이의 상대위상각 변화를 나타낸다. 또, 그림 5는 가중치  $w_1$ 이 0.4,  $w_2$ 가 0.6인 경우에 있어서 에너지 및 직렬 콘덴서의 총투입량 변화를 나타낸 것이며, 30세대 이후 두 양은 거의 변화가 없게 되고, 그림 6은 이 때의 각 발전기 사이의 상대위상각 변화 곡선이다.

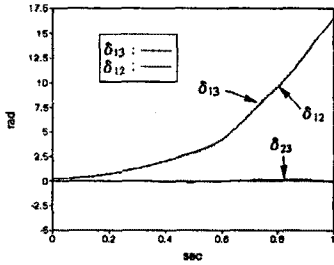


그림 2 비제어시 동요곡선  
Fig. 2 Swing curves without control

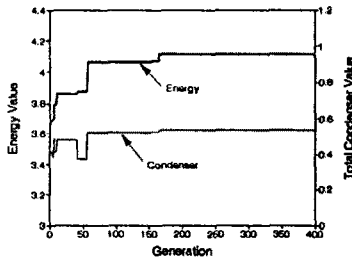


그림 3 에너지 및 총투입량의 변화(단일목적함수일 때)  
Fig. 3 Variation of energy and total injected condenser's value (for single objective function)

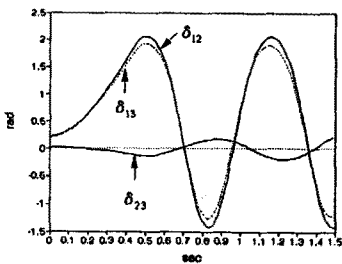


그림 4 동요곡선(단일목적함수일 때)  
Fig. 4 Swing curves (for single objective function)

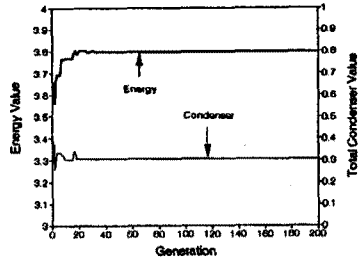


그림 5 에너지 및 총투입량 변화 ( $w_1=0.4, w_2=0.6$ )  
Fig. 5 Variation of energy and total injected condenser's value (for  $w_1=0.4, w_2=0.6$ )

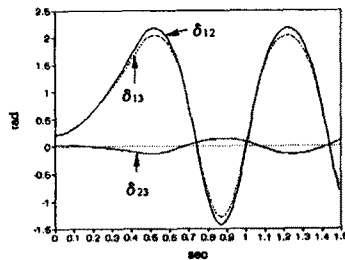


그림 6 동요곡선 ( $w_1=0.4, w_2=0.6$ )  
Fig. 6 Swing curves (for  $w_1=0.4, w_2=0.6$ )

## 6. 결론

본 연구에서는 과도안정도 향상을 위한 직렬콘덴서의 투입 최적화 방안을 제시하였다. 임계에너지 최대화와 직렬콘덴서 총투입량 최소화를 다중목적함수로 구성하여, 제약조건을 갖는 다중목적함수의 최적해를 탐색하였다. 효율적인 최적화를 위하여 임계에너지를 적정한 에너지 기대값으로 놓음으로써 임계에너지 최대화 문제를 최소화 문제로 변경하였다. 또한, 전역적 탐색기법인 유전알고리즘을 이용하여 직렬콘덴서의 최적 설치위치와 투입량을 동시에 결정함으로써 과도안정도를 향상시킬 수 있었다.

## 7. 참고문헌

- [1] F. S. Prabhakara, "A Simplified Determination of Stability Regions for Lyapunov Methods," IEEE Trans. Vol. PAS-94, pp. 672-689, March/April 1975.
- [2] T. Athay, "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability," IEEE Trans. Vol. PAS-98, pp. 573-584, March/April 1979.
- [3] 趙建民, 川本俊治, "臨界エネルギー感度に基づく過渡安定度の向上," 電學論B, 114권 4호, pp. 352-359, 平成6年
- [4] 유석구, 문병서, 김규호, 이상근, "가변 직렬콘덴서를 이용하여 과도안정도 향상을 위한 유전알고리즘 응용," 대한전기학회 춘계학술논문집, pp. 33-36, 1996
- [5] C. E. Bowler, D. H. Baker, "FACTS and SSR - Focus on TCSC Application and Mitigation of SSR Problems," Proceedings : FACTS Conference EPRI TR-100504 , 1992
- [6] M. A. Pai, "POWER SYSTEM STABILITY - Analysis by the Direct Method of Lyapunov," North-Holland Publishing Co. 1981
- [7] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs," 2nd, Springer Verlag, 1992
- [8] 김규호, 유석구, "상정사고를 고려한 전압무효전력 예방제어," 대한전기학회 논문지 44권 9호, pp. 1141-1149, 1995
- [9] E. W. Kimbark, "POWER SYSTEM STABILITY : Vol 1. Elements of Stability Calculations," Wiley, 1976